

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. Libor Nohál

**KORELACE ZMĚNY SIGNÁLU AE S ROZVOJEM  
KONTAKTNÍHO POŠKOZENÍ**

**CORRELATION OF AE SIGNAL CHANGES TO  
ROLLING CONTACT DAMAGE PROPAGATION**

*Zkrácená verze PhD Thesis*

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

Oponenti:

Klíčová slova:

Akustická emise, identifikace poškození, zpracování signálu, kontaktní únava, AXMAT

Key Words:

Acoustic emission, damage identification, signal processing, rolling contact fatigue, AXMAT

Místo pro uložení práce:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně.

© Ing. Libor Nohál

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

# OBSAH

ÚVOD.....	5
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	6
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU.....	8
3 CÍL PRÁCE.....	9
4 METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ.....	10
4.1 EXPERIMENTÁLNÍ APARATURA .....	10
4.2 Experimentální materiál.....	11
4.2.1 <i>Vzorky materiálu</i> .....	11
4.2.1 <i>Použité mazivo</i> .....	12
5 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK .....	13
5.1 Korelace parametrů akustické emise s rozsahem degradace .....	13
5.2 Zkoušky trvanlivosti oceli 17MnCr5 a 100Cr6 .....	17
5.3 Vliv maziva na parametry akustické emise.....	20
5.4 Porovnání výsledků trvanlivosti oceli 100Cr6.....	21
5.5 Význam nově získaných poznatků.....	25
6 ZÁVĚR.....	26
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	27
7.1 Výběr z literatury autora k dané problematice.....	29
8 CURRICULUM VITAE .....	30



## ÚVOD

V současné době je kladen velký důraz na ekologii, přidanou hodnotu pro zákazníka a spolehlivost nabízených produktů. Z tohoto hlediska získává technická diagnostika a nedestruktivní zkoušení důležité postavení ve vývoji, monitorování kvality a sledování provozních parametrů strojních celků i jednotlivých součástí. Mezi klíčové strojní součásti můžeme zařadit i valivá ložiska, protože jejich selhání vede ve většině případů ke ztrátě funkčnosti strojního celku, či až k jeho destrukci a vysokým ekonomickým ztrátám (např. poškození převodovek větrných elektráren, uložení válcovacích stolic apod.).

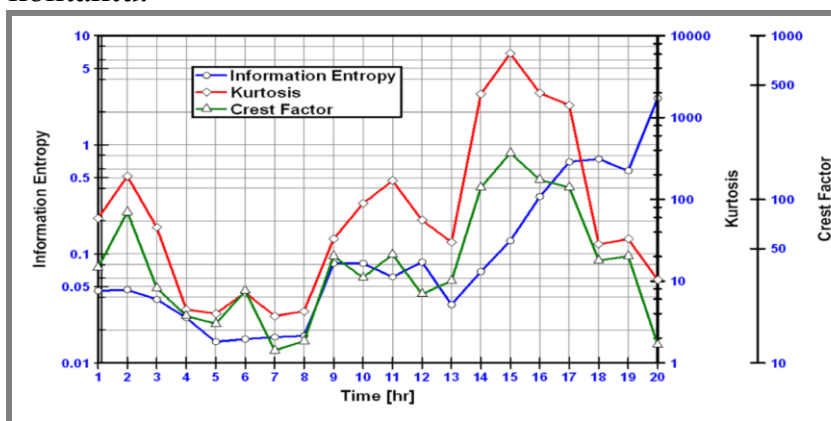
Valivá ložiska patří ke strojním součástem se širokým rozsahem využití. S tím jak dochází k čím dál výraznějšímu začleňování techniky do každodenního života, rostou i požadavky kladené na valivá uložení a jejich spolehlivost. Příčinou selhání ložisek může být několik faktorů, špatná montáž, nevhodné mazání, kontaminace ložiska a kontaktní únava materiálu. Z technického hlediska jsou životnost a užité parametry ložisek ovlivněny třením, opotřebením, parametry mazání, reologií maziva, materiálovými vlastnostmi a kontaktní mechanikou dané vnitřní geometrie ložiska. Pokud valivá ložiska pracují za optimálních podmínek, jsou všechny příčiny selhání a poškození ložisek kromě únavy materiálu eliminovány. Výrobci valivých ložisek potřebují ověřit trvanlivost jejich výrobků a použitých materiálů. Zkoušky materiálů na odolnost proti kontaktní únavě jsou proto důležité z hlediska verifikace kvalitativních vlastností dodávaných materiálů, studium mechanismů vzniku kontaktní únavy, vlivu aditiv maziv a různého tepelného zpracování na trvanlivost kontaktu apod. Zpřesnění identifikace počátku vzniku kontaktní únavy je možné pomocí metody akustické emise (AE), která dokáže díky vyšší citlivosti a vyššímu frekvenčnímu spektru proti vibracím detekovat i napětěvé vlny emitované počátečními stádii kontaktní únavy.

Tato dizertační práce navazuje na řadu prací, které se zabývaly problematikou identifikace poškození metodou AE, zpracováním signálu AE, či lokalizací zdrojů akustické emise. Rozšiřuje zejména předchozí dvě práce, kde první z nich je dizertační práci Filipa Horta [1] s názvem *Diagnostický systém pro kontrolu ložisek s využitím metody akustické emise*, kde autor experimentálně ověřil na zkouškách radiálních kuličkových ložisek na stanicích SA67 schopnost akustické emise detekovat poškození a provedl srovnání charakteru signálu AE získaného z povrchu ložiska a z povrchu stanice. Další práce s názvem *Vývoj nové generace zařízení s pokročilou diagnostikou pro stanovení kontaktní degradace* [2] Jiřího Dvořáčka se zabývá modifikací konstrukce zkušební stanice pro zkoušky axiálně zatěžovaného plochého vzorku s možností provádět zkoušky dynamicky zatěžovaných ložisek a popisuje kvalitativní využití základních parametrů akustické emise pro popis průběhů zkoušek.

# 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Počátky aplikace metody akustické emise v monitorování vzniku poškození ve valivých ložiscích, respektive valivém kontaktu, můžeme datovat do 70. let 20. století. Yoshioka a Fujiwara [5] provedli sérii experimentů na zařízení pro zkoušky plochého vzorku. Vzorek materiálu byl axiálně zatěžován kontaktním tlakem 4 759 MPa přes tři kuličky vedené v kleci. Některé prezentované experimenty proběhly i při zatížení 5 700 MPa. Experimentální zařízení bylo poháněno elektromotorem s konstantními otáčkami  $660 \text{ min}^{-1}$  a mazáno minerálním olejem. Metoda AE detekovala pomocí časové četnosti událostí dřívější stádium kontaktní únavy než zrychlení vibrací, čas detekce akustickou emisí je označen jako „Ta“, přibližně 20 min před zastavením zkoušky. Choudhury a Tandon [11] studovali vliv velikosti defektu, změny otáček a zatížení na parametry signálu AE v časové oblasti na válečkovém ložisku. Výsledky experimentů prokázali, že parametr počet překmitů přes detekční práh (ringdown counts) výrazně reagoval na rozvoj počátečního defektu. Nicméně rozvoj výraznějšího defektu ( $> 0.5 \text{ mm}$ ) nedokázal reflektovat. Hodnota počtu překmitů stagnovala při změně zatížení (25 až 125 kg) a rostla při změně otáček (500 až  $1\,500 \text{ min}^{-1}$ ), bez ohledu na lokalizaci defektu (váleček, kroužek). Morhain a Mba [10] prováděli experimenty s cílem nalézt optimální prahovou hodnotu pro detekci poškození pomocí počtu překmitů přes detekční práh ve valivém kontaktu. Výsledky poukázaly na to, že hodnota maximální amplitudy korelovala s rostoucí rychlostí, ale ne se zatížením a velikostí defektu. Bylo prokázáno, že vztah mezi mechanickou integritou povrchu a počtem překmitů přes detekční práh je závislý na volbě detekčního prahu.

Na předchozí práci navázali Elforjani a Mba [6], [12], [21] kteří publikovali řadu prací zabývajících se detekcí přirozeně vzniklého kontaktního poškození na plochem vzorku / axiálním ložisku. Tyto práce se zabývají studiem využití metody akustické emise pro detekci a lokalizaci pittingu na povrchu materiálu. Kromě standardních parametrů AE je využito pro detekci informační entropie, špičatosti a činitele výkyvu (obr. 1.1). Parametry získané ze signálu akustické emise byly porovnávány se zrychlením vibrací a teplotou. Experimenty byly cíleny na identifikaci vzniku a následného šíření podpovrchových mikrotrhlin vedoucích ke vzniku povrchových defektů v místě kontaktu.



Obr. 1.1 Výsledky informační entropie, špičatosti a činitele výkyvu [21]

Činitel výkyvu a koeficient špičatosti kopírují společný trend během celé zkoušky. Z počátku reagují výrazněji proti informační entropii, nicméně v závěru zkoušky, kdy vzniká a roste defekt na povrchu vzorku, jejich hodnota klesá až pod hodnotu, která byla na začátku zkoušky. Autoři proto konstatovali, že nejcitlivěji reaguje na praskavý signál, který je emitován vzniklým spallingem, parametr informační entropie.

Rahman et al. [7] se zabývali identifikací počáteční fáze kontaktního poškození materiálu a jeho lokalizací využitím metody akustické emise. Pro experiment bylo využito zkušební zařízení sestávající se ze dvou radiálně zatížených kotoučů. Zkouška probíhala při konstantní rychlosti otáčení a neproměnném zatížení. Z výsledků bylo usuzováno, že podstatným parametrem pro vyhodnocení kontaktního poškození je časová četnost událostí.

Fan et al. [14] studovali vliv kontaminovaného maziva na parametry signálu AE. Porovnávali maximální amplitudu, počet překmitů přes detekční práh, události AE a frekvenční charakteristiku snímaného signálu. Konstatovali, že frekvenční analýza umožňuje rozlišit stav mazacího filmu (kontaminaci) ve valivém kontaktu.

Tandon et al. [15] vycházel z předchozích prací a provedl experimenty s kontaminovaným mazivem na zkušební stanici s kuličkovým radiálním ložiskem 6205 při otáčkách hřídele  $1\,440\text{ min}^{-1}$ . Signál byl snímán piezoelektrickým snímačem AE s rezonanční frekvencí 375 kHz, celkové zesílení signálu bylo 60 dB a signál byl filtrován ve frekvenčním pásmu  $250 \div 500\text{ kHz}$ . Pro zhodnocení stavu kontaminace byla sledována maximální amplituda signálu AE. Autoři porovnávali několik metod monitorování stavu ložisek (SPM, vibrace) s metodou akustické emise a konstatovali, že akustická emise reagovala na změny velikosti a množství kontaminantů nejcitlivěji. Pouze na kontaminanty oxidů železa byla zaznamenána vzhledem k jiným metodám nejmenší odezva.

Dalším způsobem jak získat informace ze signálu v případech, kdy dochází fyzikálně k amplitudové modulaci signálu lokalizovaným defektem [21], je využití obálkové analýzy. V tomto případě lze signál demodulovat numericky pomocí komplexního analytického signálu díky Hilbertově transformaci, z jehož absolutní hodnoty získáme obálku signálu.

Časově-frekvenční charakteristiky signálu jsou analyzovány pomocí okénkové transformace nebo pomocí vlnkové transformace. U většiny publikovaných článků jsou tímto způsobem detekovány výrazně větší defekty, odpovídající rozsáhlému spallingu, což je velikost poškození vyžadovaná při precizaci zkoušek trvanlivosti.

## 2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Na zkoušky trvanlivosti materiálů existují různé konstrukční konfigurace zkušebních zařízení, kde každá z nich má své specifika a je vhodná pro jiný typ experimentu [16]. Z hlediska přenosu informace o trvanlivosti valivého kontaktu na reálné ložisko jsou nejvhodnější modelové zkoušky [16]. V laboratořích Ústavu konstruování tomu odpovídají zkušební zařízení AXMAT II.

V literatuře byly popsány zkoušky s aplikací metody AE převážně na zařízeních pro zkoušky plochého vzorku [5], [6], případně okrajově v konfiguraci disk – disk [7], a na čtyř-kuličkovém stroji [8]. Tento fakt je způsoben nutností umístit snímač akustické emise co nejbližší uvažovanému zdroji AE.

Pro detekci kontaktního poškození byly voleny zpočátku (70. léta 20. století) převážně parametry z časové oblasti – časová četnost emisních událostí praskavého signálu. I přes omezené možnosti vyhodnocení bylo možno detekovat spalling o několik desítek minut dříve než pomocí vibrodiagnostiky [5], [9].

Později byl studován vliv rozsahu poškození na velikost amplitudy, časovou četnost překmitů a RMS, respektive absolutní energii signálu. Nejlépe korelovala s rozsahem poškození RMS a časová četnost počtu překmitů. Bylo prokázáno, že zásadní vliv na získání relevantní informace ze signálu AE má nastavení prahové hodnoty pro detekci časové četnosti překmitů [9], [11].

Přítomnost defektu (odpovídající velikosti výraznému spallingu) byla také identifikována v několika pracích obálkovou analýzou, kdy vysokofrekvenční signál AE byl modulován frekvencí přechodu valivých elementů přes defekt na povrchu valivé dráhy [10], [11], [12]. V současné době bylo provedeno několik studií využívající pro determinaci přítomnosti defektu pokročilé formy zpracování signálu. Pro kvalitativní hodnocení poškození využívají převážně energetické parametry signálu (RMS, absolutní energie, ASL). Velikost defektu kvantifikovali pomocí časově-frekvenčních analýz založených na okénkové transformaci (STFT), nebo spojitě/diskrétní vlnkové transformaci. Nicméně velikost detekovaného defektu odpovídala výraznému spallingu. Několika autory byla také prokázána souvislost mezi kontaminací maziva pevnými částicemi a růstem parametrů akustické emise (maximální amplituda, RMS) [13].

Zkoušky pro ověření odolnosti materiálu proti kontaktní únavě vyžadují určitý soubor zkušebních vzorků, jelikož trvanlivost kontaktu je stochasticky podložený parametr, který lze modelově popsat pomocí Weibullova dvouparametrického rozdělení.

Doposud nebyla souhrnně provedena studie vlivu detekce počátku kontaktní únavy pomocí metody akustické emise na parametr základní trvanlivosti  $L_{10}$ . Publikované práce se zaměřovali pouze na omezený počet zkoušek a jeden typ materiálu, případně uměle vytvořené defekty.

Současný stav proto neumožňuje spolehlivě kvantifikovat defekt v počátečním stádiu pro zkoušky trvanlivosti a nezohledňuje limity pro využití AE ve zkouškách kontaktní únavy.



### 3 CÍL PRÁCE

Dizertační práce se zabývá oblastí hodnocení vzniku kontaktní únavy pomocí metody akustické emise na zařízeních pro zkoušky plochého vzorku. Cílem dizertační práce je stanovit vhodné parametry pro vyhodnocování kontaktního poškození pomocí metody akustické emise, porovnat jejich změnu vzhledem ke změně rozsahu poškození a ověřit vliv této metodiky na hodnotu základní trvanlivosti.

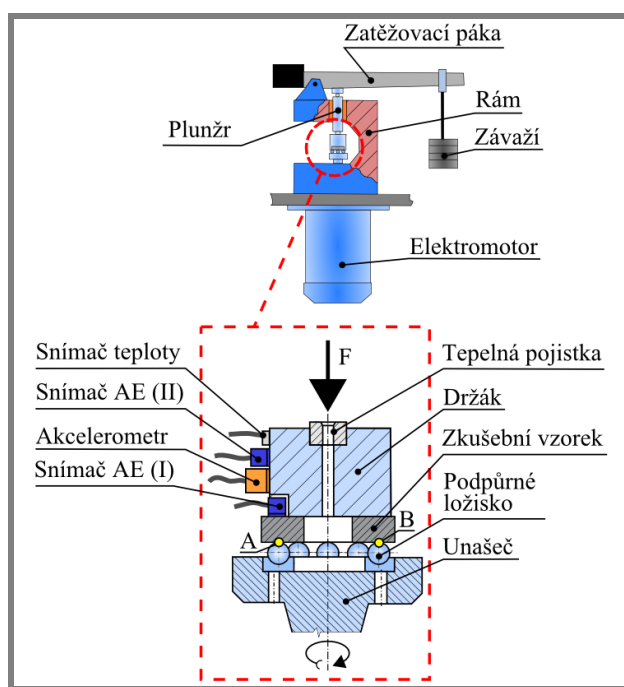
Splnění cíle dizertační práce předpokládá splnění následujících dílčích cílů:

- ❖ Identifikace vhodného parametru signálu AE charakterizujícího projevy kontaktní únavy při zkouškách materiálů na odolnost proti kontaktní únavě.
- ❖ Ztotožnění vybrané změny signálu s rozsahem degradace.
- ❖ Zpracování parametrů AE pro dva charakteristické ložiskové materiály.
- ❖ Ověření vlivu typu maziva na výsledek zkoušky.
- ❖ Vypracování návrhu a verifikaci metodiky aplikace metody AE pro zpřesněné hodnocení vzniku kontaktního poškození na zařízení AXMAT.

## 4 METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ

### 4.1 EXPERIMENTÁLNÍ APARATURA

Pro experimentální studium vzniku kontaktní únavy byla použita modifikovaná zkušební stanice určená pro zkoušky plochých vzorků materiálu AXMAT II (Obr. 4.1) sestávající se z rámu, pohonné a zatěžovací jednotky, řídicího systému a měřicí aparatury pro snímání vibrací, teploty a signálu akustické emise. Toto experimentální zařízení bylo navrženo především za účelem ověřování kvality materiálu a jeho tepelného zpracování. Dále umožňuje provádět výzkum vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktů, zkoušky trvanlivosti za vyšší nebo snížené teploty, zkoušky trvanlivosti axiálních ložisek apod. Zatížení valivého kontaktu odpovídalo maximálnímu Hertzovu tlaku 5 000 MPa, otáčky byly konstantní  $1380 \text{ min}^{-1}$ . Před každou zkouškou byly opěrné kroužky, kuličky a mazivo vyměněny. Po zkoušce byla provedena vizuální kontrola vzhledu valivého kontaktu, zbytků maziva a povrch valivých drah byl prozkoumán optickým mikroskopem.



Obr. 4.1 Konstrukce zkušební stanice AXMAT II

Pro monitorování vibrací a teploty bylo poříto dvoukanálového analyzátoru vibrací *Vibrocontrol 1500* společnosti Brüel & Kjær Vibro GmbH. Zařízení průběžně monitoruje hladinu vibrací i hodnotu teploty a vzorkuje tyto parametry předem nastavenou vzorkovací frekvencí. Signál z akcelerometru je vzorkován frekvencí 15 kHz s citlivostí 100 mV/g. Vzhledem k tomu, že hladina vibrací a teplota sloužili jako porovnávací parametry, byla vzorkovací frekvence nastavena na jeden vzorek za 0,5 minuty. Snímač vibrací a snímač teploty byly přilepeny na povrch držáku vzorku, viz obr. 4.1. Při experimentech byl použit snímač teploty Pt 100 a snímač vibrací (akcelerometr) Wilcoxon ES-08100B s frekvenčním rozsahem  $2 \div 10\,000 \text{ Hz}$ .

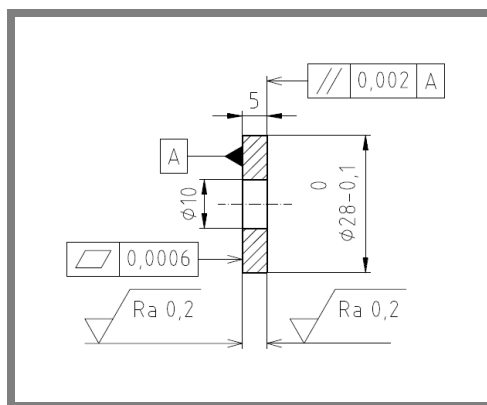
Pro monitorování akustické emise byla použita aparatura společnosti DAKEL XEDO-IPL-AESWITCH. Jedná se o propojenou sestavu dvou analyzátorů akustické emise DAKEL-XEDO a DAKEL-IPL. Pro průběžné monitorování parametrů signálu AE v této konfiguraci slouží analyzátor XEDO určený především pro průmyslové aplikace. Jedná se o 8 kanálový přístroj, jehož měřicí jednotka je navržena pro připojení pasivních piezoelektrických snímačů bez předzesilovače, tak aktivních snímačů s integrovaným předzesilovačem. Napájení předzesilovače je prováděno napětím +12V po koaxiálním kabelu z kanálového vstupu. Analogový signál ze snímače je po filtraci zesílen zesilovačem s nastavitelným ziskem a přiveden na 12 bitový A/D převodník. Dále je signál zpracováván digitálně v programovatelném hradlovém poli, kde jsou testována překročení prahů, detekují se emisní události apod. Výstup převodníku je zároveň přiveden na DMA vstup digitálního signálového procesoru, kde je emisní signál vzorkován frekvencí 2, 4 nebo 8 MHz. Analyzátor zpracovává šestnáct úrovní časové četnosti překmitů přes detekční práh (od 50 % do 800 % z rozsahu signálu – krok 50 %), efektivní hodnotu signálu (RMS) a vzorkuje signál a zpracovává parametry hitů (doba trvání, doba náběhu a maximální amplituda) [20].

Časová konstanta pro zpracování časové četnosti překmitů a RMS byla z předchozích měření stanovena na 500 ms, což umožňuje optimální rozlišení parametrů AE vzhledem k množství ukládaných dat.

## 4.2 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL

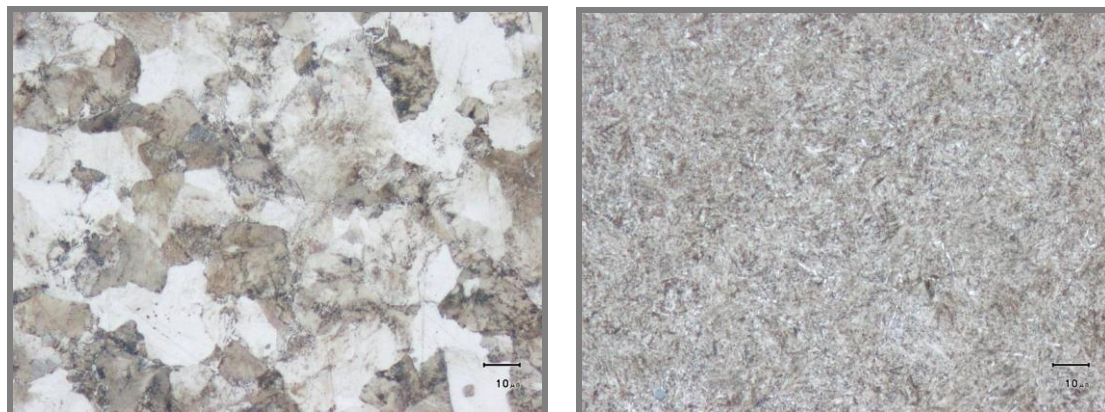
### 4.2.1 Vzorky materiálu

Pro zkoušky při podmínkách za použití opěrného kroužku ložiska ZKL 51102 P6 byly připraveny materiálové vzorky odpovídající nákresu na obrázku 4.2. Vzorky byly vyrobeny ze dvou ložiskových ocelí odpovídajících normě ČSN EN ISO 683–17. První série vzorků byla vyrobena z prokalující oceli 100Cr6 (odpovídá dle ČSN 14 109) z tyčového polotovaru soustružením, tepelně zpracovány (termální kalení) a následně přebroušeny na požadovanou drsnost. Vzorky byly austenitizovány při teplotě 810°C po dobu 10 minut a poté kaleny do oleje. Následně byly popuštěny při teplotě 160°C po dobu 4 hodin.

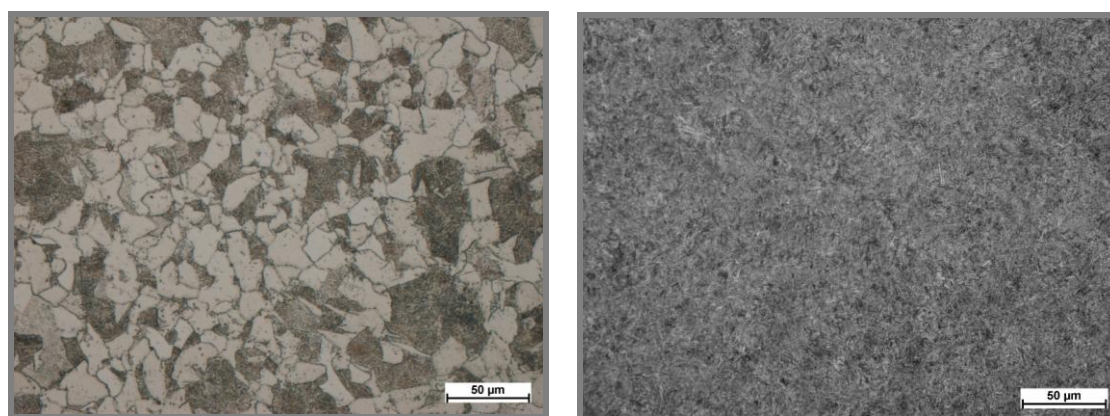


Obr. 4.2 Geometrie zkušební vzorku [4]

Druhá série vzorků byla vyrobena z oceli k cementování 17MnCr5 dle ČSN EN ISO 683-17 (odpovídá dle ČSN 14 220) shodným technologickým procesem třískového obrábění jako první série. Tyto vzorky byly cementovány při teplotě 910°C, ochlazeny na 770°C a následně kaleny do oleje. Poté byly popuštěny při teplotě 180°C po dobu jedné hodiny.



Obr. 4.3 Struktura materiálu 100Cr6 před (vlevo) a po martenzitickém kalení (vpravo) – 1000x



Obr. 4.4 Struktura materiálu 17MnCr5 před (vlevo) a po tepelným zpracováním (vpravo) – 500x

#### 4.2.1 Použité mazivo

Při každé zkoušce bylo aplikováno množství  $2 \pm 0,2$  g plastického maziva do oběžné dráhy opěrného kroužku.

Během zkoušek bylo používáno standardní průmyslové mazivo na bázi lithného mýdla MOGUL LV 2–3.

Pro zhodnocení vlivu maziva na výsledek provedených zkoušek byla realizována série zkoušek s mazivem METANOVA F1.5 s EP přísadou. Toto mazivo tvoří mononukleární vrstvy na povrchu součástí valivého kontaktu, jejichž cílem je výrazné snížení opotřebení kontaktních ploch.

Pro první sérii experimentů na oceli 17MnCr5 bylo použito mazivo RENOLIT DURAPLEX EP2. Toto mazivo bylo zvoleno vzhledem k návaznosti na předchozí experimenty prováděné na pracovišti autora [1]. Základní vlastnosti maziva jsou blízké mazivu MOGUL (vzhledem k mazivu METANOVA). V provedených experimentech nebyly zaznamenány relevantní rozdíly v průběhu parametrů AE.

## 5 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK

Experimenty byly rozděleny na dvě části. První série experimentů se zabývala korelací parametrů akustické emise naměřených na vzorcích materiálů s předem definovanou velikostí přirozeně vzniklého defektu. V druhé sérii experimentů byly realizovány úplné zkoušky kontaktní únavy na 20 vzorcích materiálu pro oceli 100Cr6 a 17MnCr5. Následně byly stanoveny základní trvanlivosti těchto materiálů určených pomocí hladiny vibrací a parametrů akustické emise.

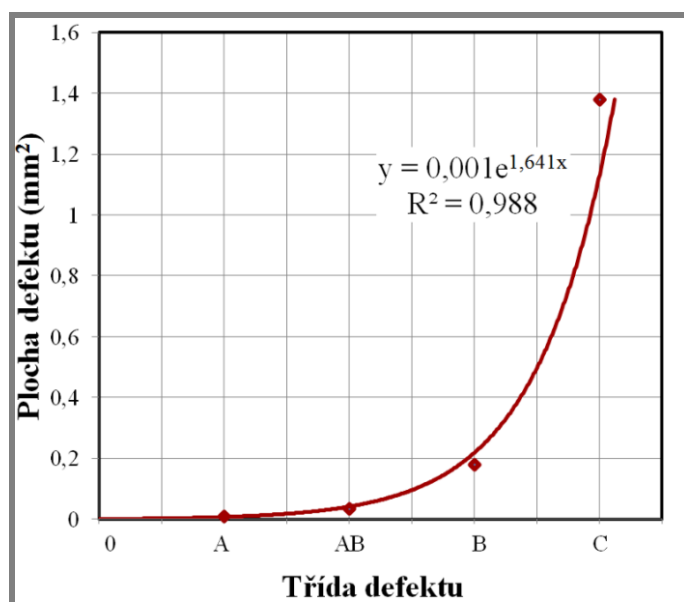
### 5.1 KORELACE PARAMETRŮ AKUSTICKÉ EMISE S ROZSAHEM DEGRADACE

Pro klasifikaci rozsahu kontaktního poškození na povrchu zkušebního vzorku byly defekty rozčleněny do čtyř tříd označených A, AB, B a C. Jednotlivé třídy odpovídají různému stupni rostoucího poškození. Typologie defektů v závislosti na ploše defektu je definována v tabulce 5.1.

Tab. 5.1 Definice tříd rozsahu defektu

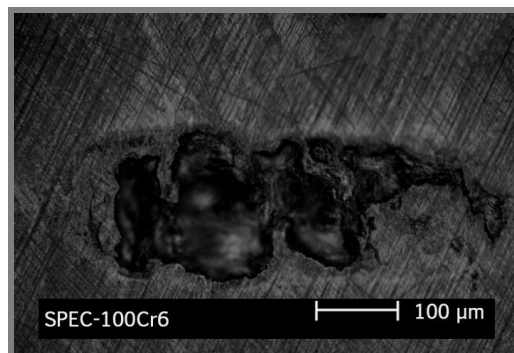
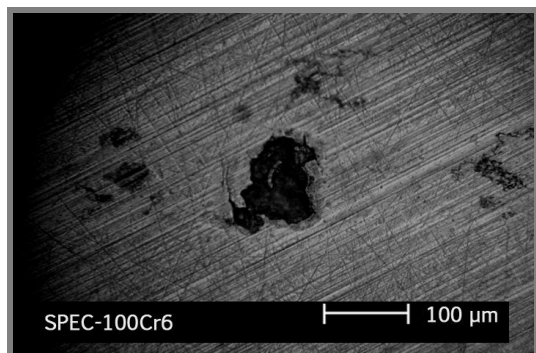
Třída	Plocha defektu (mm <sup>2</sup> )
A	0,01
AB	0,035
B	0,18
C	1,38

Velikost defektů pro experimenty byla volena s ohledem na skutečnost, že při zkouškách trvanlivosti plochého vzorku dochází k šíření pittingu exponenciálně, viz [16].

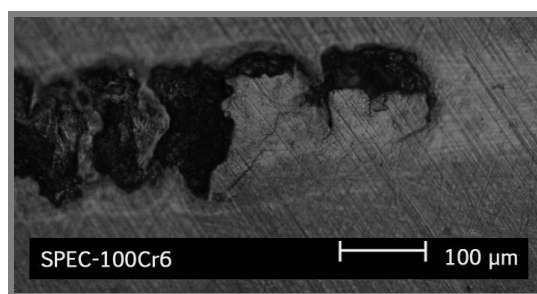
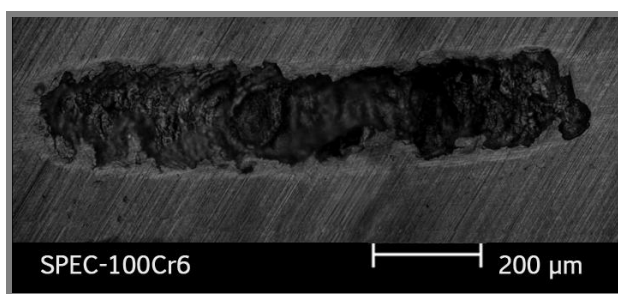


Obr. 5.1 Závislost velikosti defektu

Každá ze tříd tedy reprezentuje určitou fázi rozvoje kontaktního poškození materiálu. Třída A odpovídá hraniční velikosti defektu detekovatelného metodou akustické emise (vychází z předběžných měření), třída AB reprezentuje prvotní velikost defektu detekovanou při standardních zkouškách materiálu proti kontaktní únavě pomocí rychlosti vibrací, třída B běžnou velikost defektu detekovanou při těchto zkouškách a třída C charakterizuje masivní poškození vzorku rozsáhlým pittingem. Defekty jsou zobrazeny na obrázcích 5.2 a 5.3.



**Obr. 5.2** Defekt třídy A (vlevo) a defekt třídy AB (vpravo)



**Obr. 5.3** Defekt třídy B (vlevo) a detail defektu třídy C (vpravo)

Během těchto zkoušek byly pro komparaci vybrány společně s rychlostí vibrací následující parametry akustické emise:

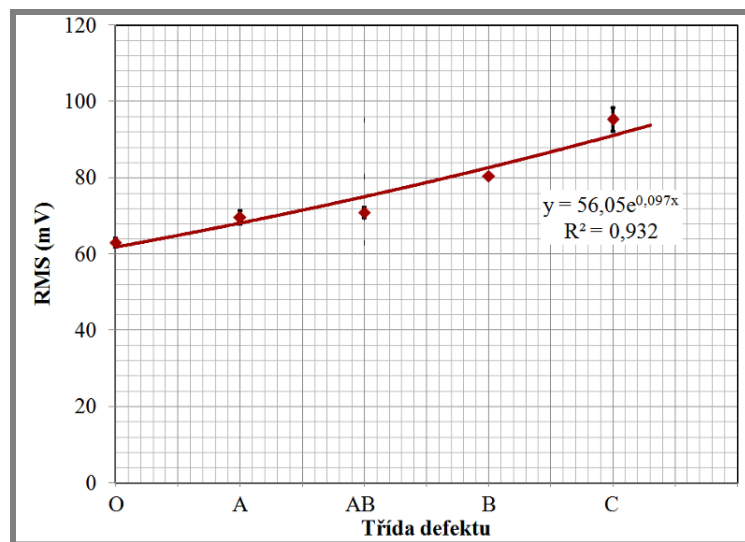
- ❖ maximální amplituda,
- ❖ RMS,
- ❖ činitel výkyvu (CF),
- ❖ frekvenční charakteristika (FFT),
- ❖ frekvenční spektrum obálky signálu.

Na každém vzorku příslušné třídy defektu byly provedeny tři srovnatelná měření a zaznamenáno, po stabilizaci zkušebního uzlu (20 min), dvacet vzorků signálu délky 1s pro další analýzu. Výsledné parametry (pokud to jejich charakter umožňuje) byly zprůměrovány a jsou prezentovány v následujících grafech se směrodatnou odchylkou.

Výsledky průměrné hodnoty parametru RMS jsou uvedeny v obr. 5.4. Je patrné, že tento parametr reaguje výrazněji až na defekty třídy B a C.

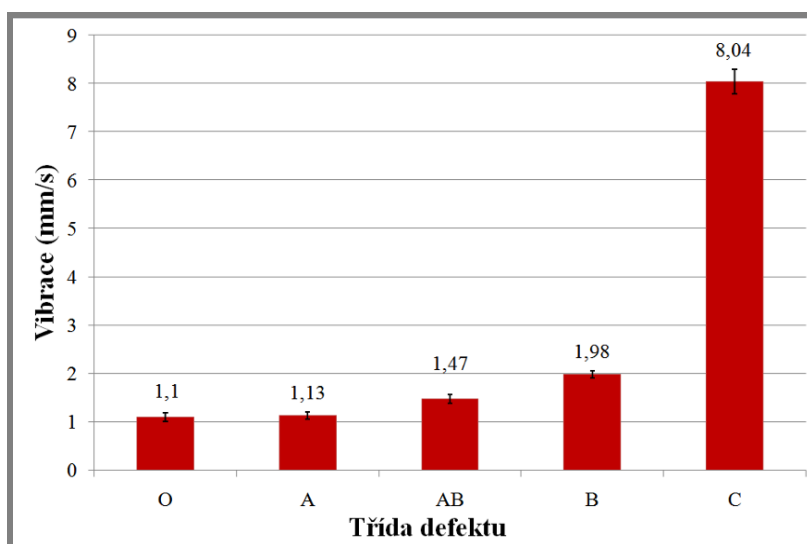


U defektů třídy A a AB je patrný jen malý rozdíl a i odstup od základní hodnoty vzorku bez defektu je malý. Dle očekávání je u malých defektů rozptýl naměřené hodnoty velmi malý a u výrazného spallingu (třída C) je pozorována významná fluktuace hodnot, což je způsobeno rozsahem poškození i kontaktem více jak jedné kuličky s defektem.



**Obr. 5.4** Průměrná hodnota RMS v závislosti na třídě

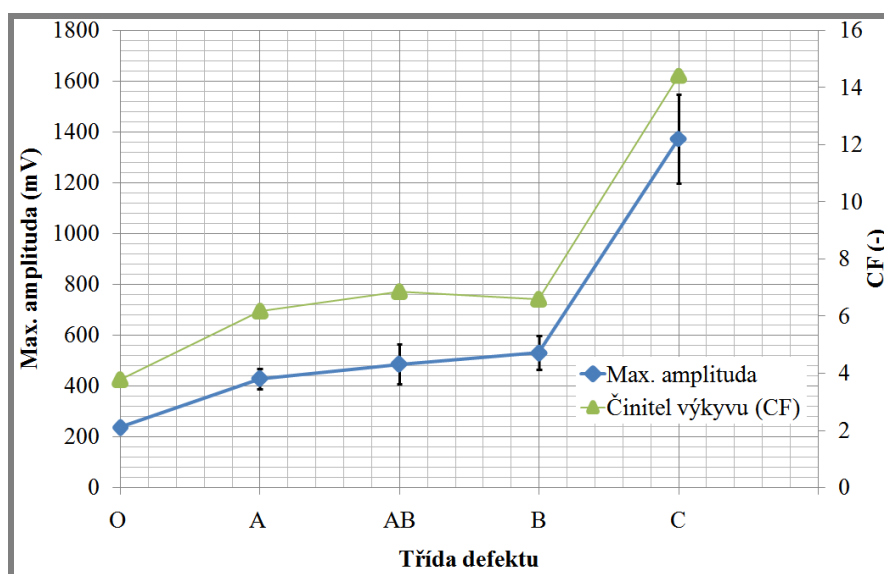
Na obr. 6.7 je zobrazena průměrná hodnota rychlosti vibrací pro jednotlivé třídy defektu a komparační vzorek bez defektu. Je zřejmé, že třídu defektu A nelze prakticky rozlišit od vzorku bez defektu. Vzorek třídy AB má již odstup, který lze považovat za spolehlivý pro detekci pittingu a vzorek třídy B odpovídá hladině vibrací standardně detekovaného defektu. Vzorek třídy C má výrazný odstup od třídy B.



**Obr. 5.5** Hladina vibrací – třída defektu

Na obr. 5.6 je zobrazeno porovnání max. amplitudy vzorku signálu a činitele výkyvu. Max. amplituda s rostoucí mírou degradace roste, ale výraznější změny jsou patrné pouze mezi vzorkem bez defektu a vzorkem s defektem třídy A, dále pak mezi vzorkem s defektem třídy B a vzorkem C. S mírou degradace také roste směrodatná odchylka maximální amplitudy. V tomto ohledu nejsou parametrem AE max. amplitudy defekty třídy AB a B rozlišitelné.

Činitel výkyvu detekuje lépe přítomnost defektu na povrchu vzorku a odstup od počáteční hodnoty 3,7, charakterizující vzorek bez defektu, na hodnotu 6,16 je výraznější než u maximální amplitudy. Rozdíl mezi hodnotou vzorku třídy A a vzorkem AB již není tak výrazný ( $\Delta = 0,7$ ). U vzorku B potom dochází dokonce k mírnému poklesu činitele výkyvu. U vzorku s třídou defektu C potom dochází k razantnímu nárůstu, který je svým gradientem srovnatelný s růstem maximální amplitudy.



**Obr. 5.6** Porovnání maximální amplitudy a činitele výkyvu pro jednotlivé třídy defektů

V některých případech defekt amplitudově moduluje vysokofrekvenční signál AE chybovou frekvencí defektu, která je závislá na kinematických vazbách v kontaktu (počet kuliček, otáčky). Frekvenci defektu můžeme proto jednoduše definovat podle následujícího vztahu:

$$FDV = \frac{n_L * N_k}{2} \quad (5.1)$$

kde

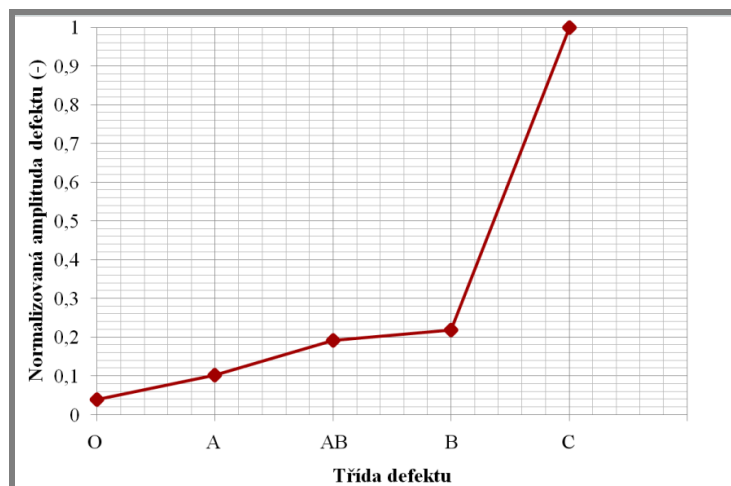
FDV – frekvence defektu;

$n_L$  – otáčky ložiska ( $s^{-1}$ );

$N_k$  – počet kuliček v kontaktu (-).



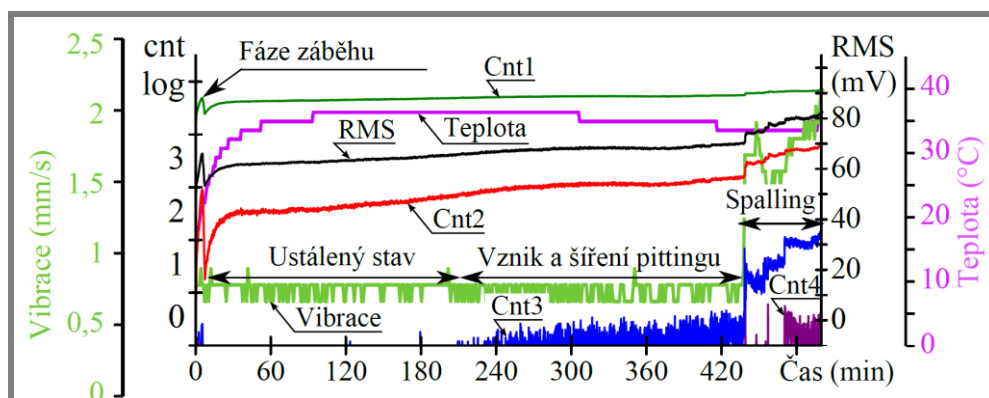
Na obrázku 5.7 je zobrazena normalizovaná hodnota amplitudy chybové frekvence defektu (241,5 Hz) vzhledem k maximální hodnotě (defekt třídy C). Frekvenční spektrum bylo získáno rychlou Fourierovou transformací (FFT) z obálky signálu detekované analytickým signálem Hilbertovy transformace. Chyba detekované frekvence od teoretické hodnoty odpovídá 2%.



Obr. 5.7 Porovnání normalizované amplitudy chybové frekvence (FDV)

## 5.2 ZKOUŠKY TRVANLIVOSTI OCELI 17MnCr5 a 100Cr6

Typický záznam základních parametrů z modifikované stanice AXMAT II je zobrazen na obr. 5.8. Jsou zde porovnány čtyři hladiny četnosti překmitů přes detekční práh (označeny Cnt1 až Cnt4), efektivní hodnota signálu AE (RMS) a dále rychlost vibrací a teplota.



Obr. 5.8 Záznam ze zkoušky vzorku 17MnCr5 – zkouška N1 [17] – upraveno

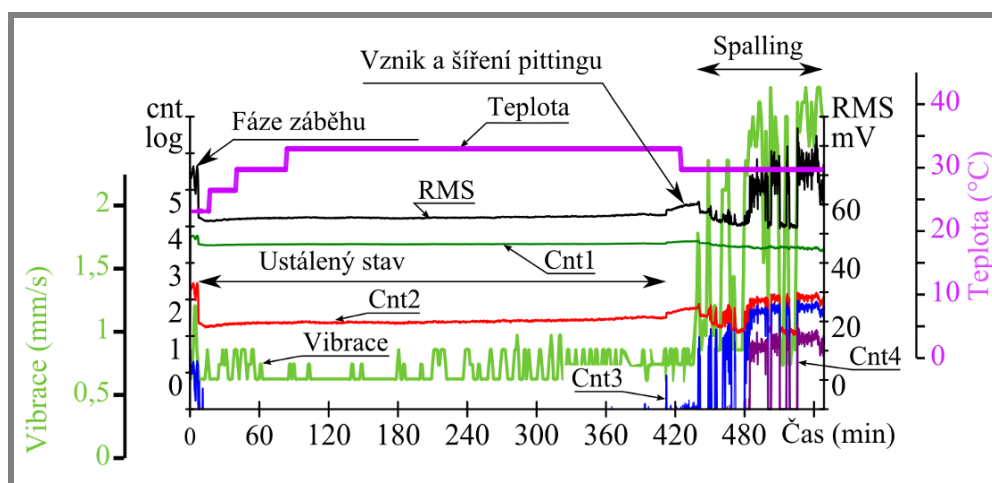
Na obr. 5.8 jsou patrné čtyři fáze zkoušky (označené N1) zaznamenané akustickou emisí. Nejprve dochází k záběhu vzorku, kdy se materiál nachází díky vysokému zatížení v plastické oblasti a vytváří se na povrchu plochého vzorku oběžná dráha. Zároveň je vytlačováno přebytečné plastické mazivo z kontaktu a dochází k tepelné stabilizaci zkušebního uzlu. Tyto jevy mají za následek změnu všech základních parametrů AE v časové oblasti – dochází k razantnímu růstu RMS, počtu překmitů přes detekční práh. Hladina vibrací tuto fázi nedokáže rozlišit,

dochází pouze k pozvolnému nárůstu teploty, až do její stabilizace cca po 70 minutách od počátku zkoušky na 37 °C. Fáze záběhu trvá maximálně 15 minut od začátku zkoušky a po ní následuje ustálený stav, kdy nedochází k výrazným změnám v parametrech akustické emise. Po 230 minutách dochází k pozvolnému růstu parametrů AE, především pak četnosti překmitů přes detekční práh, kdy je patrný zejména nárůst v třetí hladině (Cnt3), což reprezentuje vyšší amplitudu signálu AE a jeho menší frekvenci. Následuje fáze rozvoje makropoškození (spalling), které je detekováno jak akustickou emisí (RMS, Cnt1 až Cnt3), tak pomocí rychlosti vibrací. Ve 440. minutě zkoušky dochází k vytržení materiálu z povrchu vzorku a následnému zvětšování takto vzniklého defektu. Z obr. 5.8 je patrné, že hladina vibrací koreluje s úrovní RMS a četností překmitů v jednotlivých hladinách. Tato zkouška probíhala za zvýšeného zatížení odpovídající kontaktnímu Hertzovu tlaku 5 937 MPa (analyticky určeno).

Zkouška byla ukončena, když hladina vibrací překročila empiricky stanovenou úroveň 2 mm/s. Konečné poškození je zobrazeno na obr. 5.10 a odpovídá třídě velikosti defektu B.

Na obrázku 5.9 je zobrazen průběh monitorovaných parametrů signálu akustické emise, vibrací a teploty ze zkoušky vzorku ložiskové ocele 100Cr6 (označeno N4). V prvních cca 15 minutách zkoušky je patrná opět fáze záběhu a vytváření oběžné dráhy, jako tomu bylo u cementační oceli.

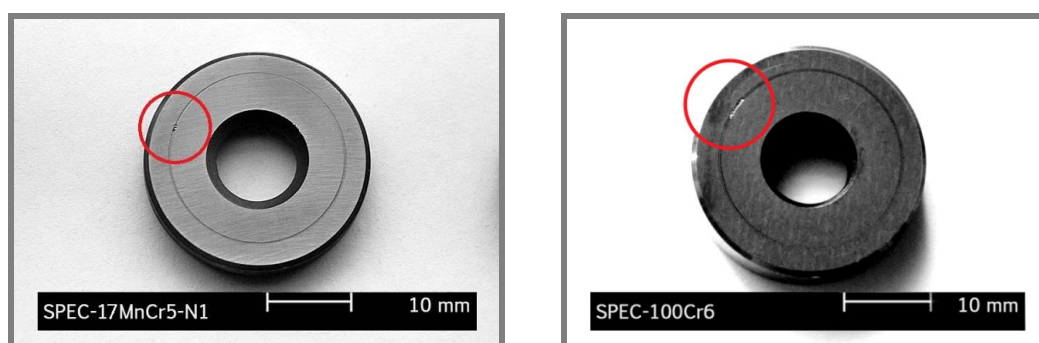
Následuje ustálený stav, při kterém nedochází k výrazným změnám parametrů AE a jejich hodnota je přibližně konstantní. Během této fáze rychlost vibrací osciluje kolem hodnoty 0.8 mm/s a teplota zůstává konstantní na hodnotě 35°C. Doba teplotní stabilizace zkušebního uzlu je obdobná jako při zkouškách cementační oceli a k ustálení teploty dochází po cca 80 minutách zkoušky.



Obr. 5.9 Záznam ze zkoušky vzorku 100Cr6 – zkouška N4 [18] – upraveno

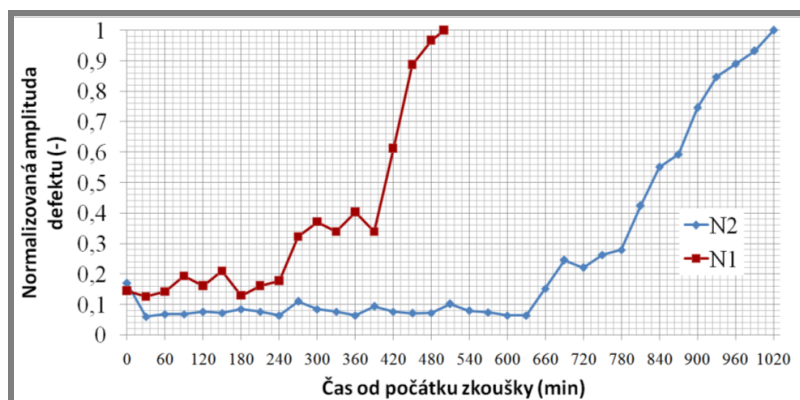
Po 400 minutách zkoušky dochází ke skokovému nárůstu časové četnosti překmitů ve třech hladinách (Cnt1 až Cnt3) a RMS. Hladina vibrací v tomto časovém rámci zachovává trend z ustáleného stavu. Dochází k vytváření pittingu v oběžné dráze vzorku, v jehož důsledku dochází ke ztrátě optimálního mazacího

filmu. Ve 440. minutě zkoušky dochází k výraznému skokovému nárůstu emisní aktivity, zejména v časové četnosti překmitů (Cnt3) indikující zvyšující se amplitudu detekovaného signálu AE a přítomnost praskavého signálu. Celková energie signálu naopak mírně poklesla. V tomto okamžiku dochází k vytržení materiálu z povrchu vzorku a vytvoření počátečního spallingu. Tento jev je detekován i pomocí hladiny vibrací a zvýšení jejich hodnoty na cca 3 mm/s. Až do 480. minuty zkoušky nedochází k výrazné progresy defektu a sledované veličiny oscilují kolem stabilizované hodnoty. Z charakteru parametrů AE je patrné, že v tomto okamžiku jsou detekovány oddělené hity praskavého signálu s vysokou amplitudou. Po 480. minutě dochází k dalšímu rapidnímu skoku všech sledovaných parametrů a k růstu jejich trendu až do ukončení zkoušky, kdy hodnota vibrací překročila nastavený práh 4 mm/s. Poslední fáze (od 480. minuty) odpovídá pozvolnému zvětšování spallingu v důsledku narážení valivých elementů na hranu defektu a následnému uhlazování takto vzniklého povrchu defektu. Tento jev (někdy nazýván jako uzdravování) se projevuje v signálu kolísáním aktuálních hodnot parametrů AE i vibrací s trvalým rostoucím gradientem. V závislosti na velikosti rostoucího defektu oscilace ustává v důsledku přítomnosti spojitého signálu generovaného průchodem kuliček přes povrch defektu.



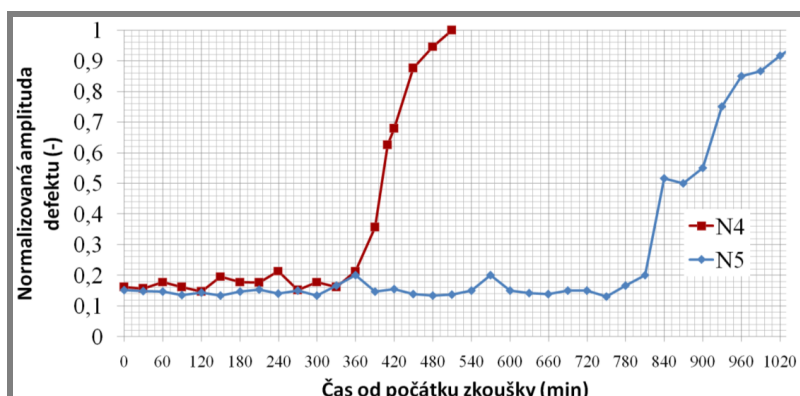
**Obr. 5.10** Povrch vzorku 17MnCr5 po zkoušce N1 [17] (vlevo) a vzorku 100Cr6 po zkoušce N4 (vpravo)

Na obr. 5.11 je zobrazen průběh amplitudy chybové frekvence ze zkoušek cementační oceli. Jsou patrné výrazné změny cca v 250. minutě (N1) a v 700. minutě (N2) identifikující vznik pittingu.



**Obr. 5.11** Průběh normalizované amplitudy chybové frekvence – zkouška N1 a N2

Na obr. 5.12 je zobrazen průběh amplitudy chybové frekvence pro zkoušky N4 a N5. V místech se zvýšenou emisní aktivitou (RMS, časová četnost překmitů) dochází k výraznému nárůstu hodnoty, což potvrzuje přítomnost počáteční fáze defektu.

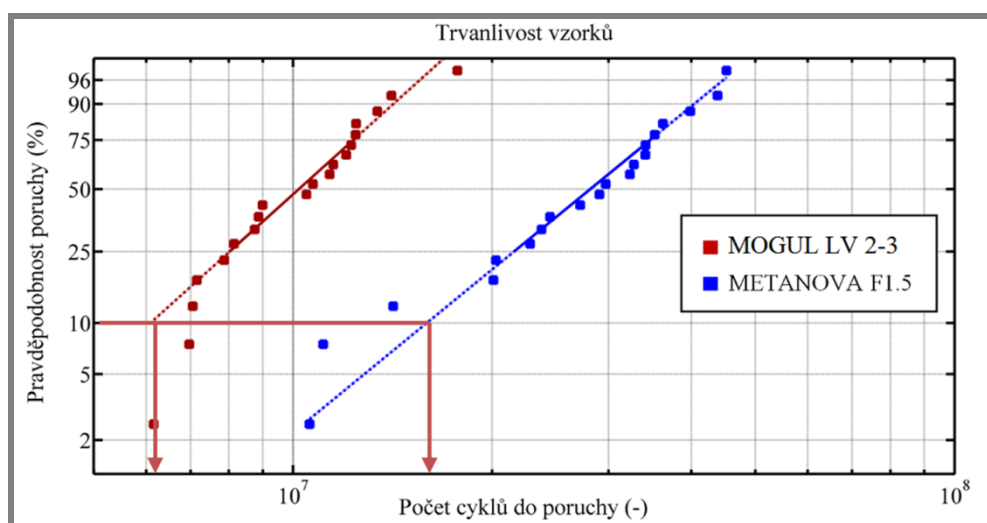


Obr. 5.12 Průběh amplitudy chybové frekvence – zkouška N4 a N5

Pokud porovnáme výsledky amplitudy chybové frekvence ze zkoušek cementační oceli (N1, N2) a prokalitelné oceli (N4, N5) můžeme konstatovat, že v obou případech tento parametr spolehlivě detekoval prvotní poškození zvýšenou úrovní s výrazným odstupem od základní hladiny charakterizující ustálený stav zkoušky.

### 5.3 VLIV MAZIVA NA PARAMETRY AKUSTICKÉ EMISE

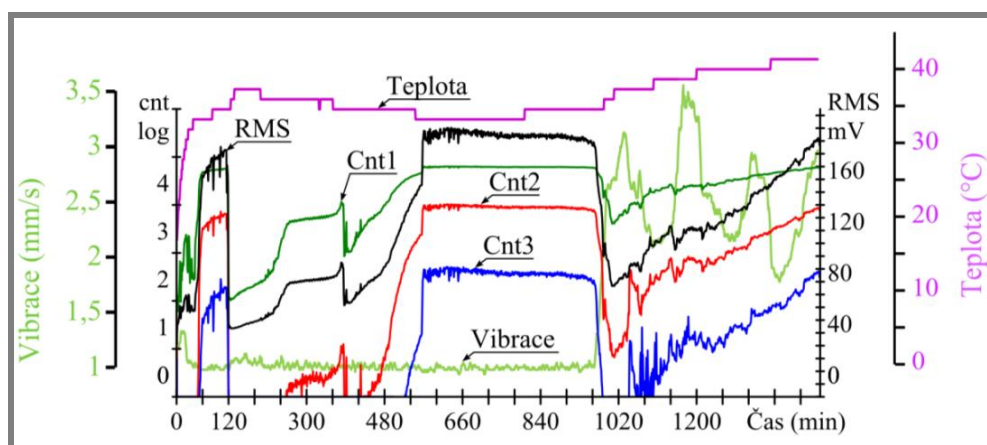
Signál akustické emise nasnímaný při zkouškách kontaktní únavy materiálu, respektive zkouškách trvanlivosti ložisek, jak ukázaly práce Miettinen a dalších [13–15], může být ovlivněn druhem maziva, mírou jeho degradace a jeho kontaminací. Z tohoto důvodu byly provedeny dvě série zkoušek trvanlivosti materiálu 100Cr6 s rozdílnými druhy maziva. Tyto zkoušky byly provedeny v rámci bakalářské práce [4] pod vedením autora této dizertační práce a dále samostatně zpracovávány.



Obr. 5.13 Trvanlivost kontaktu pro dva druhy maziv [19]

Porovnání výsledků zkoušek trvanlivosti kontaktů mazaných standardním průmyslovým plastickým mazivem MOGUL LV 2–3 a mazivem s EP přísadami METANOVA F1.5 je na obr. 5.13. Trvanlivost stejného materiálu se užitím maziva s EP přísadou výrazně zvýšila, viz tab. 5.2.

Parametry akustické emise RMS a četnosti překmitů, respektive vibrací jsou porovnány v grafu 5.14. Je zde patrná fáze záběhu, na kterou reagují všechny parametry AE. Po této fázi trvající cca 15 minut dochází oproti zkoušce s použitým standardním mazivem k nárůstu hodnot RMS i četnosti překmitů.



**Obr. 5.14** Záznam parametrů AE při použití maziva METANOVA F 1.5 [18] – upraveno

Tento jev je patrně způsoben reakcí EP přísad v mazivu s povrchem materiálu, čímž dochází k jeho modifikaci a zvýšení trvanlivosti. Po této fázi dochází k pozvolnému nárůstu všech parametrů AE. Následuje ustálený stav, kde parametry AE zůstávají konstantní po dobu cca 20 až 25 % doby trvání zkoušky. Poté následuje pokles a následný růst hodnoty parametrů indikující šíření spallingu.

Typický záznam zkoušky ložiskové ocele 100Cr6 mazané standardním mazivem MOGUL LV 2-3 je zobrazen na obr. 5.9. Jsou zde patrné čtyři fáze zkoušky trvanlivosti – fáze záběhu, ustáleného stavu, vzniku a šíření pittingu a fáze vytržení většího množství materiálu – vzniku a šíření spallingu.

Z důvodu absence těchto fází je standardizace hodnocení počátku kontaktního poškození u zkoušek s mazivem typu METANOVA problematické. Nicméně metoda AE přináší další informace o procesech probíhajících v kontaktu, které jsou jinak vibrodiagnostikou nezachytitelné.

## 5.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ TRVANLIVOSTI OCELI 100CR6

Pro ukončení zkoušky je třeba nastavit detekční práh na detektoru pittingu (v případě AXMAT II) na určitou hodnotu povýšenou nad průměrnou hodnotu vibrací, která charakterizuje provozní šum. Standardně se tento práh detekce nastavoval na empiricky stanovenou hodnotu na základě zkušeností obsluhy.

Na základě několika desítek provedených experimentů na různých materiálech lze určit vztah definující detekční práh přítomnosti spallingu na povrchu vzorku.



U standardně probíhajících zkoušky (dodrženy parametry viz kap. 5.1) se hladina vibrací v ustáleném stavu pohybuje v pásu **0,8 až 1,1 mm/s**.

V závislosti na těchto pozorováních lze stanovit dvě kritéria pro detekci počátku spallingu na povrchu zkoušených vzorků, viz vzorce (5.2) a (5.3).

$$A = \frac{\sum_{i=t_i-15}^{t_i} A_i}{15} + \Delta A_d \quad (5.2)$$

kde

$t_i$  – počáteční bod detekce,

$A$  – detekční práh,

$\Delta A_d$  – odstup od provozního šumu (1 mm/s),

nebo

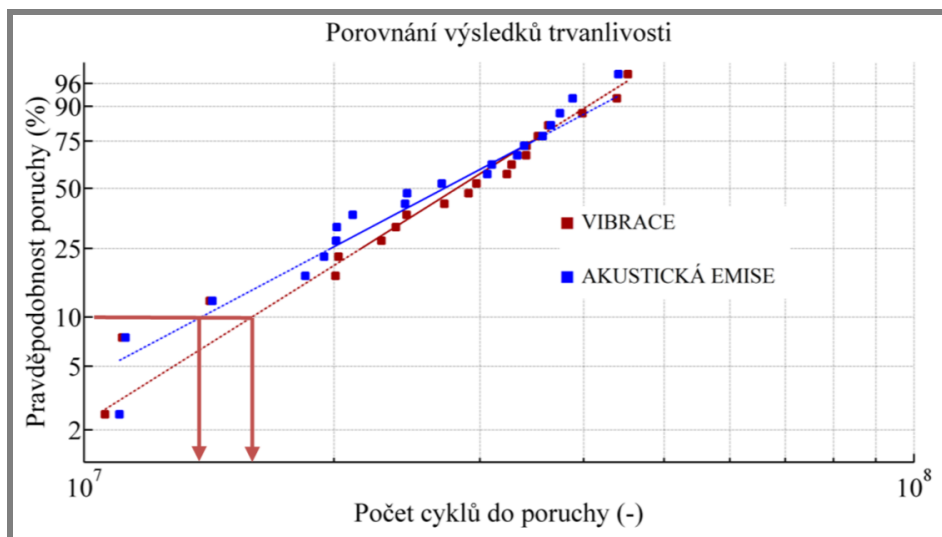
$$\nabla A = \frac{\Delta A}{\Delta t} > 0,0083 \quad (5.3)$$

První kritérium (5.2) odpovídá navýšení hodnoty rychlosti vibrací o hodnotu  $\Delta A_d$  od hladiny provozního šumu, která se stanoví jako průměrná hodnota rychlosti vibrací vypočtená z předcházejících patnácti hodnot od počátečního bodu detekce. Ten musí ležet minimálně sto minut od počátku zkoušky z důvodu eliminace vlivů záběhu, kdy dochází k dočasnému navýšení hladiny vibrací. Druhé kritérium (5.3) zohledňuje rychlost zvýšení hladiny vibrací o 0,5 mm/s za min.

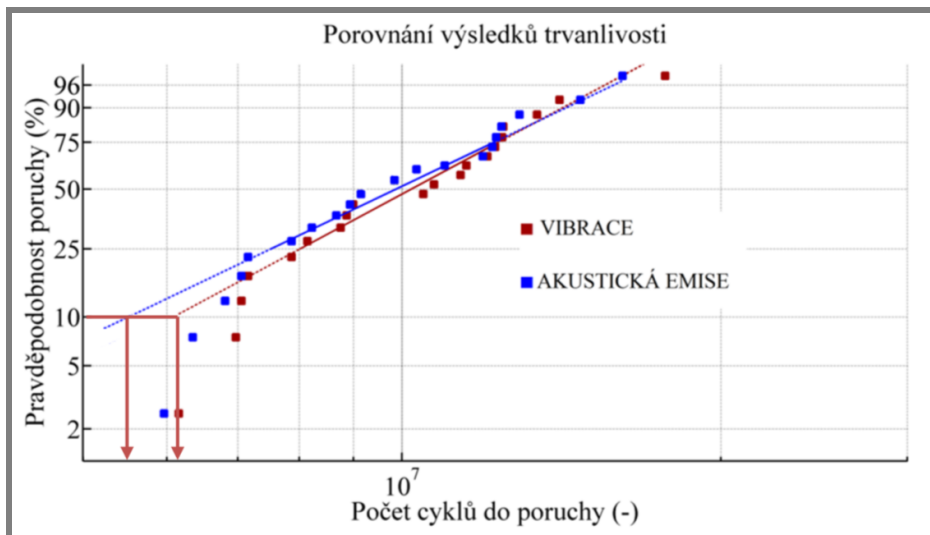
Pro precizaci počátku vzniku kontaktního poškození metodou akustické emise byly využity dva parametry, RMS, četnost překmitů přes detekční práh a pro detailnější určení počátku kontaktního poškození amplituda chybové frekvence (maximum s odstupem od šumu min. 20 %).

Průběh parametrů AE byl pro každou zkoušku posouzen samostatně a na základě změny těchto tří parametrů určena trvanlivost vzorku.

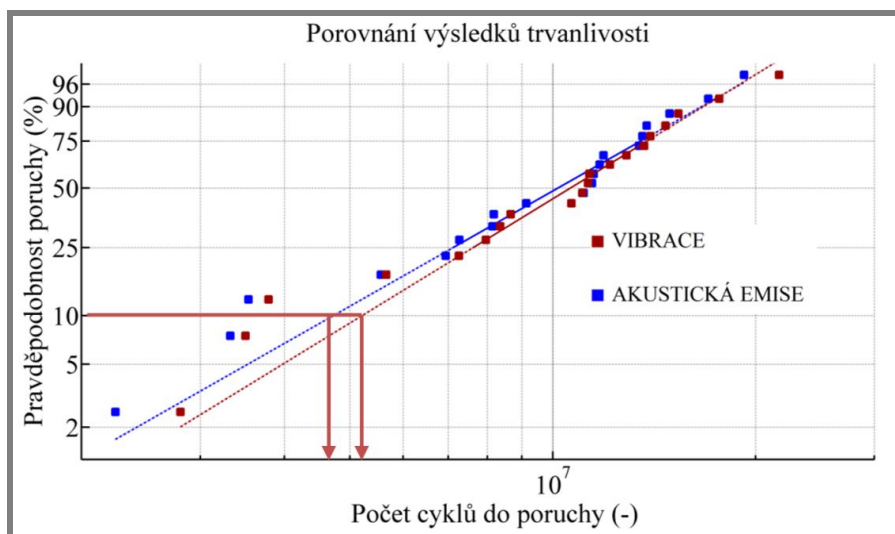
Byly provedeny kompletní tři série zkoušek, každá obsahovala 20 kusů zkušebních vzorků. Výsledná trvanlivost každého vzorku byla stanovena dvěma metodami, pomocí rychlosti vibrací a parametry akustické emise. Výsledky byly zpracovány podle předpokládaného dvou-parametrického Weibullova rozdělení do grafů pro oceli 100Cr6 (MOGUL), 100Cr6 (METANOVA) a 17MnCr5 (MOGUL). Z těchto grafů (obr. 5.15, 5.16 a 5.17) byl získán 10% kvantil trvanlivosti  $L_{10}$  (viz tab. 5.2).



Obr. 5.15 Porovnání výsledků zkoušky trvanlivosti 100Cr6 – METANOVA



Obr. 5.16 Porovnání výsledků zkoušky trvanlivosti 100Cr6 – MOGUL LV 2-3



Obr. 5.17 Porovnání výsledků zkoušky trvanlivosti 17MnCr5 – MOGUL LV 2-3

V tabulce 5.2 jsou shrnuty hodnoty 10% kvantilu trvanlivosti  $L_{10}$  a porovnán rozdíl mezi hodnotou detekovanou pomocí rychlosti vibrací a pomocí parametrů akustické emise. Při precizaci výsledků pomocí akustické emise došlo ke snížení trvanlivosti  $L_{10}$  ložiskové ocele 100Cr6 v průměru o 24 % (hodnoty s mazivem MOGUL LV 2-3 a METANOVA). V případě cementační ocele 17MnCr5 došlo ke snížení o cca 5 %.

**Tab. 5.2** Porovnání základní trvanlivosti  $L_{10}$

Vzorek	Trvanlivost $L_{10}$ ( $\times 10^6$ cyklů)	Trvanlivost $L_{10h}$ (hod)	Rozdíl (%)
100Cr6_MOGUL – Vib.	6,031	6,937	29,68
100Cr6_MOGUL – AE	4,241	4,878	
100Cr6_METANOVA – Vib.	20,332	23,386	19,07
100Cr6_METANOVA – AE	16,454	18,926	
17MnCr5_MOGUL – Vib.	8,131	9,353	4,80
17MnCr5_MOGUL – AE	8,542	9,825	

Přítomnost spallingu, který je detekovatelný i pomocí hladiny vibrací, detekovali nejlépe parametry RMS, maximální amplituda a časová četnost překmitů. Činitel výkyvu byl pro hodnocení poškození nestabilní a neměl potřebnou vypovídající hodnotu. Pro spolehlivější posouzení přítomnosti pittingu byl použit parametr amplitudy chybové frekvence, která nejrazantněji reaguje na přítomnost počátečního poškození. V místech se zvýšenou aktivitou AE (RMS, časová četnost překmitů) proto byla analyzována velikost amplitudy chybové frekvence, a pokud její hodnota dosáhla maxima s odstupem od šumu o 20 %, byla identifikována přítomnost defektu.



## 5.5 VÝZNAM NOVĚ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Na základě analýz prezentovaných v této práci byly získány následující poznatky rozšiřující současný stav poznání:

- ❖ **Byla určena** metodika vyhodnocování pomocí amplitudy chybové frekvence na základě korelace vybraných parametrů signálu s předem definovanými přirozeně vzniklými defekty. Velikost těchto defektů odpovídala jednotlivým fázím rozvoje poškození.
- ❖ **Byl posouzen** vliv maziva s EP přísadou, která vytváří na povrchu kontaktu mononukleární vrstvy, na parametry AE a detekci počátku kontaktního poškození.
- ❖ **Byl ověřen** vliv detekce počátku kontaktního poškození metodou akustické emise na trvanlivost kontaktu  $L_{10}$ , získané z úplných zkoušek trvanlivosti (20 zkoušených vzorků), což nebylo zatím publikováno.

### Náměty na rozšíření výzkumu

- ❖ Ověření vlivu viskozity maziva na parametry AE
- ❖ Ověření vlivu drsnosti povrchu vzorku na parametry AE
- ❖ Studium vlivu velikosti podpůrného ložiska a kinematických vazeb (množství kuliček) na spolehlivost detekce metodou AE

## 6 ZÁVĚR

V této dizertační práci jsou prezentovány výsledky ze zkoušek na odolnost materiálu proti kontaktní únavě s využitím metody akustické emise dvou materiálů, prokalitelné, nejčastěji užívané, ložiskové oceli 100Cr6 (14 109 dle ČSN) a cementační ložiskové oceli 17MnCr6 (14 220 dle ČSN).

Na základě zkoušek na předem definovaných přirozeně vzniklých defektech byla provedena analýza vybraných parametrů AE a porovnána změna těchto parametrů vzhledem k rozsahu degradace povrchu. Nejlépe korelovala s velikostí defektu hodnota amplitudy chybové frekvence, která vykazala nejvýraznější odstup mezi defekty tříd A ( $0,01 \text{ mm}^2$ ) až B ( $0,18 \text{ mm}^2$ ), což jsou klíčové velikosti pro rozlišení počátečního poškození materiálu. Ostatní parametry (maximální amplituda, činitel výkyvu) rostli s velikostí defektu, ale spolehlivost rozlišení u defektů třídy A až B byla nízká. Efektivní hodnota signálu dokázala spolehlivě rozlišit všechny klíčové rozdíly velikosti defektů kromě počátečních defektů A a AB ( $0,035 \text{ mm}^2$ ). Analýzou frekvenčního spektra vzorků signálu nebyla zjištěna výrazná změna využitelná pro detekci kontaktního poškození.

Následně byly parametry signálu AE analyzovány na zkouškách trvanlivosti dvou výše zmiňovaných ložiskových materiálů. Počátek kontaktního poškození byl lokalizován pomocí parametrů RMS a časové četnosti překmitů, přítomnost defektu ověřena amplitudou chybové frekvence (kritérium maxima a odstupe od šumu 20 %). Zjištěné trvanlivosti metodou AE byly zpracovány pomocí Weibullova dvou-parametrického rozdělení a byl porovnán vliv na základní trvanlivost  $L_{10}$ . U ložiskové oceli 100Cr6 se základní trvanlivost snížila v průměru o 24%. V případě cementační ložiskové oceli 17MnCr5 byl tento rozdíl výrazně nižší cca 5%. Tento fakt je přisuzován ovlivnění parametrů signálu výraznější valivou stopou, která vznikla v důsledku vyšší plastické deformace než u prokalitelné oceli (jako důsledek nižší tvrdosti povrchu vzorku).

Byly provedeny zkoušky trvanlivosti s použitím maziva METANOVA F 1.5 s vysokotlakou (EP) přísadou vytvářející v místě kontaktu mononukleární struktury. Změny parametrů AE neodpovídaly fázím kontaktní únavy (záběh, ustálený stav, vznik pittingu, rozvoj spallingu) pozorovaných u zkoušek při použití maziva bez EP aditiva. Nicméně charakter změn v parametrech signálu byl shodný u všech zkoušek s mazivem METANOVA F 1.5, proto je tento nárůst a pokles v parametrech v cca první třetině zkoušky přisuzován procesům probíhajícím na povrchu materiálu při vzniku mononukleární vrstvy. Další faktorem, který může ovlivnit parametry AE, v tomto případě může být i vyšší viskozita maziva.

Klíčovým parametrem pro identifikaci přítomnosti počáteční fáze kontaktního poškození je amplituda chybové frekvence, která je z porovnávaných parametrů nejméně ovlivněna rušivými zdroji AE.

V této práci byly korelovány parametry AE s rozsahem degradace, ověřena schopnost metody AE zpřesnit výsledky zkoušek trvanlivosti ložiskových materiálů a vytvořena metodika hodnocení trvanlivosti s využitím metody akustické emise, čímž byly splněny všechny cíle práce.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HORT, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s.  
Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [2] DVOŘÁČEK, J. *Vývoj nové generace zařízení s pokročilou diagnostikou pro stanovení kontaktní degradace*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 73 s.  
Vedoucí disertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [3] DAKEL. Systém pro sběr dat akustické emise DAKEL XEDO-IPL-AESWITCH. Praha: Dakel, 2011. str. 17. Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech, Středisko technické diagnostiky DAKEL.
- [4] ŠEMBERA, V. *Experimentální studium vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Libor Nohál.
- [5] YOSHIOKA T. a FUJIWARA T. New acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue, *Wear*, 1982, Vol. 81, No. 1, pp. 183-186.
- [6] ELFORJANI, M. a MBA, D. Detecting the onset, propagation and location of non-artificial defects in a slow rotating thrust bearing with acoustic emission. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, May 2008, Vol. 50, No. 5, p. 264-268, ISSN 1354-2575.
- [7] RAHMAN Z., OHBA H., YAMAMOTO T. a YOSHIOKA T. A Study on Incipient Damage Monitoring in Rolling Contact Fatigue Process Using Acoustic Emission, *Tribology Transactions*, 2008, Vol. 51, No. 5, pp. 543-551.
- [8] PRICE, E. D.; LEES, A. W. a FRISWELL, M. I. Detection of severe sliding and pitting fatigue wear regimes through the use of broadband acoustic emission, *Proc. IMechE Vol. 219, Part J: Journal of Engineering Tribology*, pp. 85-98, 2005.
- [9] YOSHIOKA, T; *Diagnosis of Machinery using Acoustic Emission Techniques. Acoustic Emission-Beyond the Millennium*, 2000, pp. 215-230, ISBN: 0444539158.
- [10] MORHAIN, A. a MBA, D. Bearing defect diagnosis and acoustic emission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*, 2003, Vol. 217, No. J4, pp. 257-272.

- [11] CHOUDHURY, A; TANDON, N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings, *Tribology International*, Vol. 33, No. 1, Jan 2000, pp. 39-45, ISSN 0301-679X, [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00012-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00012-8).
- [12] ELFORJANI, M. a MBA, D. Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in slow speed rolling element bearing with acoustic emission. In: *Journal of vibration and acoustics-transactions of the ASME*. Vol. 130, No. 4, p. 14, ASME, USA, 2008, ISSN 1048-9002.
- [13] MIETTINEN, J. a SALMANPERÄ, P. *Acoustic Emission Monitoring of Grease Lubricated Rolling Bearings*. In: Proceedings of the Comadem, 2000, USA, pp. 21-30, MFPT Society.
- [14] FAN, Y. E.; SHI, Z.; HARRIS, G.; GU, F. a BALL, A. Monitoring the lubrication condition of rolling element bearings using the acoustic emission technique. In: *ASME 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. American Society of Mechanical Engineers, 2006. p. 843-848.
- [15] TANDON, N.; RAMAKRISHNA, K. M.; YADAVA, G. S. Condition monitoring of electric motor ball bearings for the detection of grease contaminants. *Tribology international*, 2007, Vol. 40, No.1, pp. 29-36.
- [16] STUPKA, K. *Hodnocení ložiskové oceli na odolnost vůči kontaktní únavě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1989. 123 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Dušan Kolář, CSc.
- [17] NOHÁL, L.; HORT, F.; DVOŘÁČEK, J.; MAZAL, P. An Experimental Investigation of Rolling Contact Fatigue of Steels Using Acoustic Emission Method. *INSIGHT*, 2013, roč. 55, č. 12, s. 665-669. ISSN: 1354- 2575. DOI: <http://dx.doi.org/10.1784/insi.2012.55.12.665>.
- [18] NOHÁL, L.; KOMENDA, L.; DVOŘÁČEK, J.; MAZAL, P. The Importance of Acoustic Emission Method in the Evaluation of Durability of Rolling Contact. In *11th European Conference on NDT*. Praha. 2014.
- [19] NOHÁL, L.; KOMENDA, L.; MAZAL, P. Přínos metody akustické emise pro zkoušky kontaktní únavy. In *Defektoskopie 2014*. 2014. Brno: VUT v Brně, ČNDT, 2014. s. 83-87. ISBN: 978-80-214-5035- 6.
- [20] DAKEL. Systém pro sběr dat akustické emise DAKEL XEDO-IPL-AESWITCH. Praha: Dakel, 2011. str. 17. Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech, Středisko technické diagnostiky DAKEL.
- [21] ELFORJANI, M. a MBA, D. Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with Acoustic Emission. *Engineering Fracture Mechanics*, Jan 2010, Vol. 77, No. 1, p. 112-127.

## 7.1 VÝBĚR Z LITERATURY AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE

### Články v impaktovaných časopisech

NOHÁL, L.; HORT, F.; DVOŘÁČEK, J.; MAZAL, P. An Experimental Investigation of Rolling Contact Fatigue of Steels Using Acoustic Emission Method. *INSIGHT*, 2013, roč. 55, č. 12, s. 665-669. ISSN: 1354- 2575.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1784/insi.2012.55.12.665>

### Články v recenzovaných časopisech

NOHÁL, L.; MAZAL, P. An Evaluation of Rolling Contact Fatigue of Metallic Materials using Acoustic Emission Method. *Engineering Mechanics*, 2014, roč. 21. ISSN: 1802- 1484. (přijato k otištění)

### Články ve sbornících z konferencí

NOHÁL, L.; KOMENDA, L.; DVOŘÁČEK, J.; MAZAL, P. Importance of Acoustic Emission Method in Evaluation of Durability of Rolling Contact. In *XIth European conference on NDT*. 2014. Brno: VUT v Brně, 2014. s. 1-5. ISBN: 978-80-214-5018- 9.

NOHÁL, L.; KOMENDA, L.; MAZAL, P. Přínos metody akustické emise pro zkoušky kontaktní únavy. In *Defektoskopie 2014*. 2014. Brno: VUT v Brně, ČNDT, 2014. s. 83-87. ISBN: 978-80-214-5035- 6.

NOHÁL, L.; KOMENDA, L.; MAZAL, P. Využitelnost metody akustické emise v ložiskovém průmyslu. In *NDE for Safety/ Defektoskopie 2013*. 2013. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 255-260. ISBN: 978-80-214-4799- 8.

NOHÁL, L.; HORT, F.; MAZAL, P. An Experimental Study on Damage Monitoring of Rolling Bearings Using Acoustic Emission Method. In *The Tenth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies*. Krakow: The British Institute of NDT, 2013. s. 1-9. ISBN: 978-1-901892-37- 6.

NOHÁL, L.; MAZAL, P.; HORT, F. Analysis of Surface Initiated Damage in Thrust Bearings with Acoustic Emission. In *Proceedings 30th European Conference on Acoustic Emission Testing, 7th International Conference on Acoustic Emission*. 2012. Granada, Spain: University of Granada, 2012. s. 114- 1 (114-7 s.)ISBN: 978-84-615-9941- 7.

MAZAL, P.; NOHÁL, L.; VLAŠIC, F.; KOULA, V. Possibilities of the damage diagnostics of gearboxes and bearings with acoustic emissions method. In *Proceedings - 18th World Conference on Non- Destructive Testing*. 2012. Durban: ndt. net, 2012. s. 651-658. ISBN: 978-0-620-52872- 6.

## 8 CURRICULUM VITAE

### Osobní údaje

Ing. Libor Nohál, nar. 27. 12. 1985 ve Zlíně.

### Vzdělání

- **2010 – 2014**, Doktorské studium na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně. Téma dizertační práce: *Korelace změny signálu AE s rozvojem kontaktního poškození*.
- **2008 – 2010**, Navazující magisterské studium na FSI VUT v Brně, obor Výrobní stroje, systémy a roboty. Téma diplomové práce: Připojení vyvrtávacích hlav s CNC řízenou U-osou na horizontálních centrech Tajmac-ZPS. Ukončeno s vyznamenáním.
- **2005 – 2008**, Bakalářské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, obor Strojní inženýrství. Téma bakalářské práce: Deskripce včetně obráběcích strojů.
- **2001 – 2005**, Střední průmyslová škola Zlín, obor Strojírenství se zaměřením na CAD/CAM. Ukončeno s vyznamenáním.

### Praxe

#### Výuka, cvičení v předmětech:

- Základy konstruování (1K)
- Konstruování (2K)
- CAD (3CD)

#### Řešené projekty

- **MEB091114**, Monitorování kvality bodového svařování s využitím metody akustické emise, zahájení: 1. 1. 2011, ukončení: 31. 12. 2012
- **FR-TI3/442**, Výzkum a vývoj adaptivního systému mazání okolků kolejových vozidel, zahájení: 1. 4. 2011, ukončení: 30. 9. 2013
- **FR-TI1/371**, Integrovaný systém průběžného monitorování vybraných strojních uzlů a technologických procesů, zahájení: 1. 10. 2009, ukončení: 30. 5. 2013
- **FR-TI4/221**, Výzkum a vývoj nových energeticky úsporných pohonů tvářecích strojů, zahájení: 1. 1. 2012, ukončení: 31. 12. 2014
- **FR-TI4/295**, Výzkum a vývoj valivého uložení převodovek domíchávačů betonu, zahájení: 1. 1. 2012, ukončení: 30. 12. 2015

### Jazykové znalosti: Anglický jazyk

## **ABSTRAKT**

Tato dizertační práce se zabývá experimentálním studiem zpřesnění detekce vzniku únavového kontaktního poškození pomocí metody akustické emise. Byla realizována série experimentů na dvou reprezentantech ložiskových ocelí a pro zvolené parametry akustické emise byla provedena analýza citlivosti na přítomnost kontaktního poškození. Rozsah poškození byl klasifikován do čtyř tříd a parametry signálu nejvíce charakterizující rozvoj poškození byly korelovány s rozsahem poškození. Byl také ověřen vliv druhu maziva na signál akustické emise. Výsledky práce mají dopad na provádění zpřesněných zkoušek na odolnost proti kontaktní únavě a vyhodnocování parametrů signálu akustické emise. Na základě experimentů byla stanovena metodika provádění zpřesněných zkoušek metodou akustické emise na zařízení AXMAT II.

## **ABSTRACT**

This PhD thesis deals with the experimental study of more precise rolling contact fatigue damage detection using acoustic emission method. A series of experiments was carried out on two representatives bearing steels and the analysis of sensitivity for the presence of contact damage was performed on selected parameters of acoustic emission. The extent of damage was classified into four classes and signal parameters the most characterizing the development of damage were correlated with the extent of damage. It was also verified the influence of lubricants on acoustic emission signals. The results have an impact on the implementation of more precise rolling contact fatigue tests and evaluation of parameters of acoustic emission signal. On the basis of experiments was established methodology for more precise RCF testing method using acoustic emission on test-rig AXMAT II.